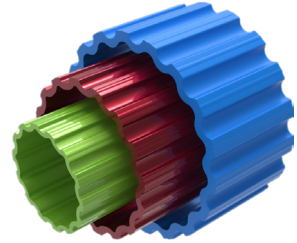


## Beitrag zur Vorauslegung dünnwandiger und auf Torsion belasteter Profilwellen



Jakob, M.

*Aus Rohren umformend hergestellte Zahnwellen bieten durch ihre geringe Querschnittsfläche deutliche Potentiale im Leichtbau gegenüber klassischen Vollwellen. Bisherige Verzahnungskonzepte und Normen ermöglichen derzeit keine gesicherte Auslegung dieser dünnwandigen Profilwellen. Dieser Artikel stellt die Vorgehensweise für eine Vorauslegung und das Potential innovativer Verzahnungsformen vor.*

*Splined shafts, cold formed from tubes, show significant advantage over torque-to-weight ratio compared with conventional solid shafts. The IMW is working on a calculation scheme to simplify and improve the design of thin-walled profile shafts.*

### Leichtbau durch Dünnwandigkeit

Welle-Nabe-Verbindungen (WNV) können nach der Art der Kraftübertragung in kraftschlüssige, formschlüssige und stoffschlüssige Verbindungen unterteilt werden. Besteht die Anforderung einer axialen Verschiebbarkeit der Verbindung unter Torsion, so werden in der Regel formschlüssige Verbindungen u.a. mit Keil- oder Zahnwellenprofilen oder Polygonprofilen eingesetzt. Insbesondere im Längenausgleich von Gelenkwellen wird oftmals eine evolventische Profilform nach DIN 5480 verwendet. Diese WNV sind heute mit wenigen Ausnahmen als Vollwellen ausgeführt. Im Sinn des Leichtbaues könnte der unter Torsion wenig belastete Kern der Welle nach Vorgaben der genannten Norm ausgespart werden. Mit zunehmendem Ausbohrungsverhältnis ist eine deutliche Spannungserhöhung im hochbelasteten Zahnfußbereich (Fußausrundung) zu verzeichnen, während im Kopfbereich die Auslastung unverändert niedrig bleibt. Es zeigt sich, dass die üblichen Verzahnungsformen, wie die DIN 5480 oder die Wildhaber-Novikov-Verzahnung bzgl. des Leichtbaues und der Umformbarkeit aus einem Rohr nur bedingt geeignet sind.

## Geometrie des neu entwickelten Profils

Als Teil eines Forschungsprojektes wird untersucht, wie eine Profilgeometrie einer innovativen und leichten Welle aus Sicht der Bauteilbelastung zu gestalten ist, die aus einem Rohr umformend hergestellt werden kann und gleichzeitig die Anforderungen an eine Verschiebeverbindung erfüllt. Das Ausgangsrohr, welches durch den Rohrdurchmesser  $D_R$  und die Wanddicke  $t_r$  definiert ist, wird im Bereich des Fußgrundes plastisch radial nach Innen geformt. Durch passende Gestaltung der Umformwerkzeuge kann im Rahmen der Umformgrenzen eine beliebige Außenkontur hergestellt werden. Die Innenkontur des Profils wird über die Kontur eines Dornes bestimmt, auf den das Rohr vor der Umformung aufgeschoben wurde. Durch umfangreiche Variantenstudien ergab sich die in Abbildung 1 dargestellte Profilform. Die Momentenübertragung erfolgt über die Flanken mit der Länge  $L_{W,Tr}$ , die Fußausrundung ist mit Ellipsen gestaltet. Das Profil wird über eine Erhebung am Zahnkopf mit der Nabe zentriert. Der Durchmesser  $D_{W,K,Z}$  der Zentrierung ist gleichzeitig der größte Durchmesser der Welle.

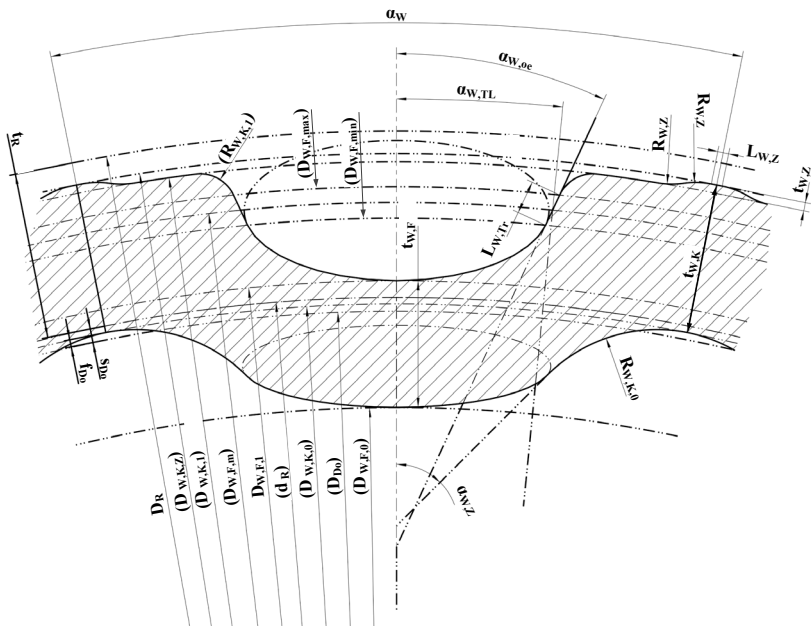


Abbildung 1: Zeichnung eines Zahnes des neu entwickelten Profils

## Gruppierung und Auswahl charakteristischer Maße

Das Profil kann durch eine Vielzahl an Längen, Winkeln und Durchmessern verändert werden. Zur Untersuchung ist die Auswahl wesentlicher Parameter notwendig und daher wurden einige Annahmen getroffen: Die Geometriewerte der Zentrierung bleiben für alle Profile konstant. Auch die Umformfaktoren, wie zum Beispiel die durch die Umformung bedingte, sogenannte „Abstreckung“ bzw. die Verjüngung der Wanddicken im Kopf- und Fußbereich, werden als konstant angenommen. Die benötigte Flankenhöhe  $L_{W,Tr}$  kann vorab berechnet werden, sodass eine mittlere Flächenpressung nicht überschritten wird. Die Flankenhöhe ist ebenfalls von einer Vielzahl an Parametern abhängig:

$$L_{W,Tr} = f(M_R, z, V_{W,B}, \alpha_{W,TL}, \alpha_{W,Oe}, D_R, D_{W,F,m}, p_{zul}) \quad [\text{mm}] \quad 1$$

Anzumerken ist hier, dass die Überdeckungslänge  $L_{\bar{U}}$  mit dem  $V_{W,B}$ -fachen des Rohrdurchmessers angenommen wurde.

Weitere Größen, wie zum Beispiel der Durchmesser  $D_{W,F,1}$ , an dem der tiefste Punkt der Fußausrundung liegt, ergeben sich über festgelegte Verhältnisse zu einem Bezugsmaß:

$$D_{W,F,1} = V_{W,G} \cdot D_R \quad [\text{mm}] \quad 2$$

$$\alpha_{W,TL} = V_W \cdot 360^\circ / z \quad [^\circ] \quad 3$$

$$R_{W,K,0} = V_{W,K,0} \cdot 0,5 \cdot (D_{W,K,0} - D_{W,F,0}) \quad [\text{mm}] \quad 4$$

Das Ausgangsrohr mit dem Durchmesser  $D_R$  und der Wanddicke  $t_R$  definiert die Hauptabmessungen des Profils. Sind diese durch das verwendete Rohr festgesetzt, so kann das Profil nur noch über folgende sechs Eingangsgrößen verändert werden:

- Zähnezahl  $z$
- Drehmoment  $M_R$  (beeinflusst die Flankenhöhe  $L_{W,Tr}$ )
- Öffnungswinkel  $\alpha_{W,oe}$
- Verhältnis zwischen Kopf- und Fußanteil  $V_W$
- Verhältnis zwischen Fußgrund- und Bezugsdurchmesser  $V_{W,G}$
- Verhältnis des Innenradius des Kopfes  $V_{W,K,0}$

## Ablauf der Vorauslegung

Das Profil wird von einer Vielzahl an Parametern bestimmt, welche auf die Spannungen im Bauteil, aber auch auf die Querschnittsfläche des Profils einen Einfluss haben. Im Rahmen einer Vorauslegung wurde ein in Abbildung 2 dargestelltes Berechnungskonzept entwickelt. Mit Hilfe des Konzeptes können für festgesetzte Rohrgrößen optimierte Geometrieparameter für das Profil ermittelt werden:

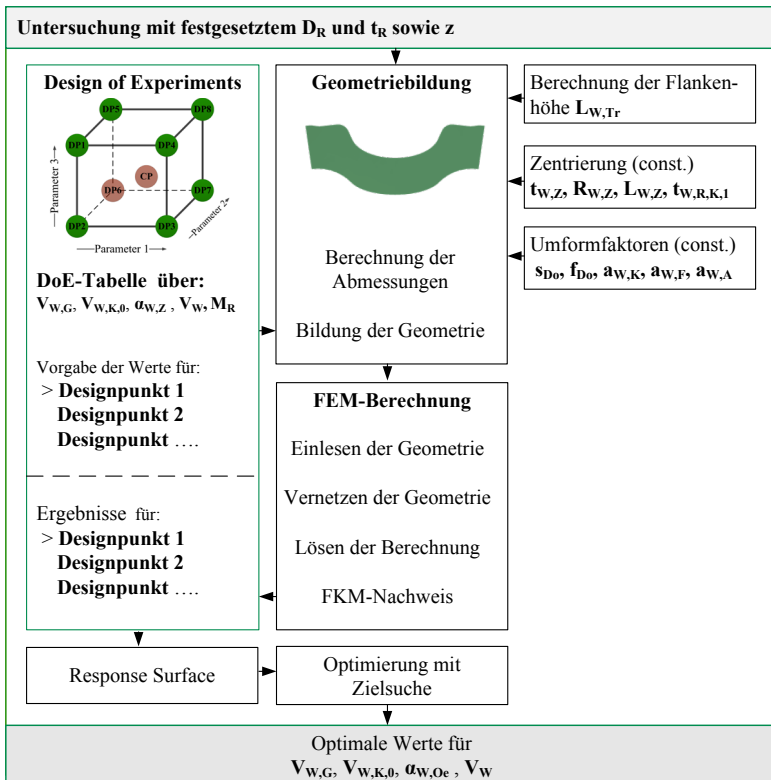


Abbildung 2 : Übersicht über die Berechnungsabfolge zur Bestimmung optimaler Geometrieparameter

## FEM-Berechnung

Die mit *CREO Parametric* gebildete Geometrie kann über eine bidirektionale Schnittstelle in *ANSYS Workbench* übertragen werden. In Voruntersuchungen zeigte sich, dass für eine erste Auslegung nur die Welle als Modell betrachtet werden kann. Diese Vereinfachung sowie eine entsprechende Vernetzung sind

wichtig, um die Rechenzeiten pro Parameterstudie auf eine akzeptable Dauer zu verkürzen. Das Sektormodell wird an der Vorderseite eingespannt und das Moment über eine resultierende Kraft auf die Zahnflanke aufgebracht.

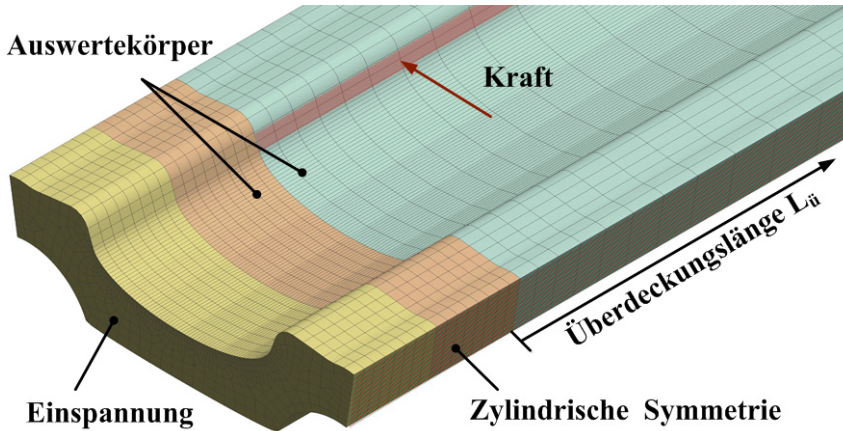


Abbildung 3: Lastannahmen für eine erste Auslegung

Als Ergebnis der Berechnung zeigt sich in Abbildung 4 dargestellter typischer Spannungsverlauf, in dem besonders im Zahnfußbereich der Verbindung sowie in der Innenkontur des Kopfes erhöhte Spannungen auftreten. Mit Hilfe eines FKM-Nachweises kann anschließend die dynamische Auslastung bestimmt werden.

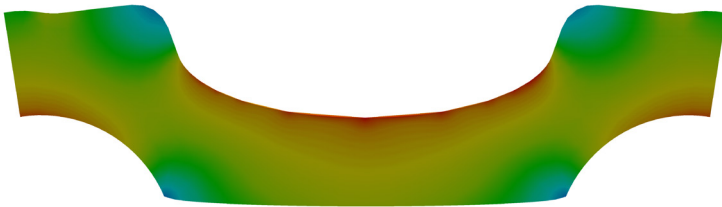


Abbildung 4: FEM-Simulation des Profis: Im Zahnfußbereich und in der inneren Kopfausrundung sind erhöhte Vergleichsspannungen (GEH) (rote Einfärbung) festzustellen

### Design of Experiments (DoE) – Festlegung der Systemgrenzen

Um den Einfluss der Eingangsgrößen auf das maximal übertragbare Drehmoment zu untersuchen, wurde ein statistischer Versuchsplan mit Zentralpunkt und flä-

chenzentriertem Design (Face-Centered-Central-Composite-Design) \1\ erzeugt. Die Einflussgrößen der erstellten Designpunkte weichen nach einem mathematischen System voneinander ab. Obwohl mehrere Größen gleichzeitig verändert werden, können nachträglich Zusammenhänge berechnet werden.

Die Variationsbreiten der Einflussgrößen sind allerdings pro Ausgangsrohr verschieden und müssen vorab festgelegt werden. Es liegt nahe, dass mit höheren Rohrdurchmessern und Wanddicken höhere Drehmomente erreicht werden können. Auch nimmt die Zähnezahl mit zunehmendem Durchmesser zu. Es zeigte sich, dass bei zu weit gefassten Definitionsbereichen für  $\alpha_{W,oe}$ ,  $V_W$ ,  $V_{W,G}$ ,  $V_{W,K,0}$  die Geometrie nicht gebildet werden kann und damit der Berechnungsablauf nicht durchgeführt werden kann.

Es empfiehlt sich daher, die Systemgrenzen und die sich daraus ergebenden Geometrien vorab zu überprüfen. Dazu kann in *CREO Parametric* die Funktion der Familientabelle verwendet werden. Diese Funktion dient dazu, ein Standardbauteil zu erstellen und Varianten über Parameter abzuleiten. Ein über *MICROSOFT Excel* vorab erzeugter Versuchsplan mit tabellarischer Auflistung der Varianten und ihrer Eingangsgrößen kann in *CREO Parametric* in die Familientabelle eingelesen werden. Über die Funktion „Varianten der Familie verifizieren“ kann automatisiert überprüft werden, ob die Varianten gebildet wurden und damit die Systemgrenzen bzgl. der Geometriebildung richtig gesetzt sind.

Die Festlegung der Systemgrenzen sollte so erfolgen, dass einerseits die Eingangsgrößen für das gesuchte Optimum innerhalb der Systemgrenze liegen, andererseits dürfen für ein ausreichend genaues Modell die Grenzen nicht zu groß gewählt werden. Die Festlegung plausibler Grenzen ist daher ein iterativer Prozess.

In *ANSYS Workbench* können nun der Reihe nach die Geometrien mit Hilfe von *CREO Parametric* eingeladen, vernetzt und berechnet werden. Charakteristische Ergebnisse wie Spannungen und Auslastungen werden in der DoE-Tabelle ergänzt.

### **Response Surface - Bildung eines mathematischen Ersatzmodells**

Aus den Eingangsgrößen und den Ergebnisgrößen der Simulation können über die response surface Methode Gleichungen erzeugt werden, die als Näherung einen mathematischen Zusammenhang zwischen diesen beiden Größen beschreiben.

### **Optimierung – Auswahl geeigneter Parameter**

Das gebildete Berechnungsmodell wird genutzt, um verschiedene Kombinationen der Eingangsgrößen durchzurechnen und ein optimales Design zu finden, welches folgende Ziele erfüllt:

- Maximieren des übertragbaren Drehmoments
- Dynamische Auslastung nach  $FKM \leq 1$
- Die Querschnittsfläche des Profils muss kleiner sein als die Querschnittsfläche des Ausgangsrohres

Zur Optimierung wird die MOGA-Methode (Multi-Objective Genetic Algorithm) verwendet. Daraus ergibt sich zum Beispiel, dass mit einem Ausgangsrohr 60x3 aus C22 ein wechselndes Drehmoment von etwa 1000 Nm dauerhaft übertragen werden kann, wenn folgende Parameter eingestellt werden:  $\alpha_{W,oe}=24^\circ$ ;  $V_W=0,24$ ;  $V_{W,G}=0,91$ ;  $V_{W,K,0}=0,88$ .

## Ergebnis und Ausblick

Die beschriebene Berechnungsabfolge wurde für die Durchmesser 40, 60 und 80 mm sowie die Wanddicken 2; 2,5; 3 und 4 mm durchgeführt. Die sich daraus ergebenden Drehmomente bilden die Stützpunkte für den in Abbildung 5 qualitativ dargestellten Verlauf.

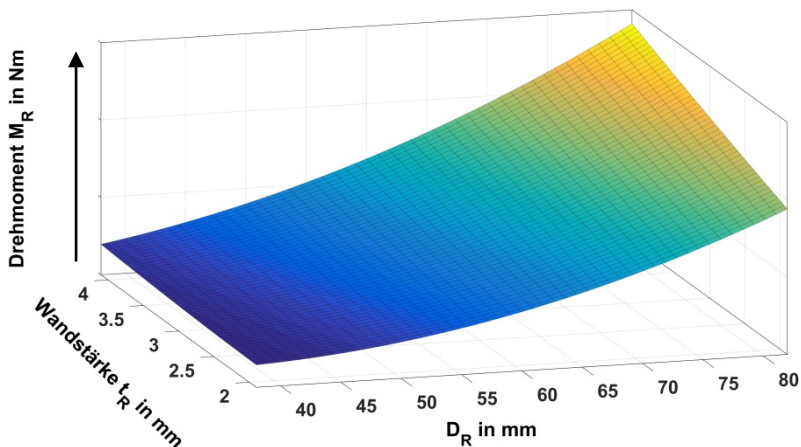


Abbildung 5: Vorauslegung dünnwandiger Profilverellen mit der IMW-Geometrie (vorläufiges Ergebnis)

Die sich aus dem Diagramm ergebenden Werte sind als erste Auslegungswerte zu sehen. Insbesondere der Einfluss der Nabe, sowie der Kontakt zwischen Welle und Nabe sind in diesem vereinfachten Modell nicht abgebildet.

Um die Berechnungen zu verifizieren, werden Anfang 2018 erste Profilverellen gefertigt, die dann sowohl statisch als auch dynamisch experimentell untersucht werden. Mit den experimentellen Nachweisen können die FEM-Modelle abgegli-

chen werden und so auf Basis eines abgesicherten FEM-Modells eine Auslegungsgrundlage für dünnwandige Profilwellen entwickelt werden.

## Zusammenfassung

Das Institut für Maschinenwesen beschäftigt sich mit der Optimierung und der Auslegung innovativer dünnwandiger Profilwellen. Dazu entstand ein für die umformtechnische Herstellung angepasstes und auf ein maximal übertragbares Drehmoment optimiertes Profil. Das vorgestellte Berechnungskonzept ermöglicht es erstmal eine Aussage über das übertragbare Drehmoment abhängig von Ausgangsdurchmesser und Wanddicke des Rohres zu treffen.

## Literatur

- /1/ Siebertz, K.; van Bebber, D.; Hochkirchen, T.: Statistische Versuchsplanung: Design of Experiments, Springer Verlag 2010

### Kooperationspartner:

Josef Hohn GmbH



Gefördert durch:



Bundesministerium  
für Wirtschaft  
und Energie

aufgrund eines Beschlusses  
des Deutschen Bundestages